UDC: 004.8 https://doi.org/10.15407/jai2023.02.016

ОПТИМАЛЬНІ РІШЕННЯ В СИСТЕМАХ, ЩО СКЛАДАЮТЬСЯ З РАЦІОНАЛЬНИХ АГЕНТІВ

С.В. Пашко[1], І.П. Сініцин[2]
[1,2]Інститут програмних систем НАН України, Україна
пр. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03187
pashko1955@gmail.com
ips2014@ukr.net
[1]https://orcid.org/0000-0002-0453-4128
[2]https://orcid.org/0000-0002-4120-0784

Анотація. Розглядаються раціональні агенти та системи, що складаються з таких агентів. Агентом вважається автономний об'єкт, який має джерела інформації про навколишнє середовище (наприклад, фізичні датчики) та впливає на це середовище (наприклад, за допомогою виконавчих механізмів). Раціональним агентом називається агент, який заради досягнення поставленої мети здатен діяти ефективно, тобто використовувати стратегії поведінки, близькі до оптимальних. Вважається, що існує функція корисності, яка визначена на множині можливих послідовностей дій агента (агентів, якщо розглядається система агентів) і приймає значення в множині дійсних чисел. Раціональний агент діє таким способом, щоб максимізувати функцію корисності. Системою раціональних агентів називається система, що складається з раціональних агентів, які мають спільну мету і діють оптимальним способом для її досягнення. Агенти діють, використовуючи оптимальний (або близький до оптимального) розв'язок екстремальної задачі, що сформульована для системи. В роботі наводяться приклади систем, що складаються з раціональних агентів. Визначаються основні групи задач і відповідні математичні методи їх розв'язання, що пов'язані з керуванням агентами і системами раціональних агентів: кооперування агентів (створення системи агентів), планування та координація дій агентів, розміщування системи агентів, розпізнавання. Кооперування необхідне, якщо жоден агент не володіє достатнім досвідом, ресурсами та інформацією для розв'язання задачі, натомість різні агенти мають досвід та можливості для розв'язання різних частин проблеми. Плануванням називається розроблення способу дій агентів та всієї системи в майбутньому в залежності від ситуацій, що можуть виникнути, вибір ефективного способу дій, оптимальний розподіл ресурсів. Координацією вважається така організація дій різних агентів, що складають систему, яка забезпечує ефективність роботи цієї системи. Важливими є задачі пошуку оптимального розміщення системи агентів та задачі розпізнаваня стану навколишнього середовища. Наведено приклади таких задач та вказано математичні методи їх розв'язання.

Ключові слова: раціональний агент, система, кооперування, планування, координація, розміщення, розпізнавання.

OPTIMAL SOLUTIONS IN SYSTEMS CONSISTING OF RATIONAL AGENTS

S. Pashko[1], I. Sinitsyn[2]
[1,2]Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
Akademika Glushkova Avenue, 40, building 5, Kyiv, 03187
pashko1955@gmail.com
ips2014@ukr.net
[1]https://orcid.org/0000-0002-0453-4128
[2]https://orcid.org/0000-0002-4120-0784

Abstract. Rational agents and systems consisting of such agents are considered. An agent is an autonomous object that has sources of information about the environment (for example, physical sensors) and affects this environment (for example, with the help of actuators). A rational agent is an agent who, in order to achieve a set goal, is able to act effectively, that is, to use behavioral strategies that are close to optimal. It is assumed that there is a utility function, which is defined on the set of possible sequences of actions of the agent (agents, if a system of agents is considered) and takes values in the set of real numbers. A rational agent acts in such a way as to maximize the utility function. A system of rational agents is a system consisting of rational agents that have a common goal and act in an optimal way to achieve it. Agents act using the optimal (or close to optimal) solution of the extreme problem formulated for the system. The work gives examples of systems consisting of rational agents. The main groups of problems and the corresponding mathematical methods of their solution related to the management of agents and systems of rational

agents are determined: cooperation of agents (creation of a system of agents), planning and coordination of actions of agents, search of placement of the system of agents, recognition. Cooperation is necessary when no single agent has sufficient experience, resources, and information to solve a problem, but different agents have the expertise and capabilities to solve different parts of the problem. Planning is the development of a method of action of agents and the entire system in the future depending on the situations that may arise, the choice of an effective method of action, optimal distribution of resources. Coordination is such an organization of the actions of various agents that make up the system, which ensures the efficiency of this system. The tasks of finding the optimal placement of agent system and the task of recognizing the state of the environment are important. Examples of such problems are given and mathematical methods of their solution are indicated.

Keywords: rational agent, system, cooperation, planning, coordination, placement, recognition.

Вступ

В останні десятиліття в рамках теорії штучного інтелекту розвивається агентно-орієнтований підхід. Агенти, наділені штучним інтелектом, називаються інтелектуальними або раціональними агентами. Вони можуть утворювати багатоагентні системи та діяти заради досягнення спільної мети.

Багатоагентні системи почали вивчатися з початку 1980-х років; дослідження в цій області стали інтенсивно проводитися з середини 1990-х років. Теорію багатоагентних систем досить повно представлено в монографії М. Вулдріджа, де розглянуто питання комунікації та взаємодії агентів, проблеми формування коаліцій агентів, планування сумісної роботи та координацію дій членів коаліції. Багатоагентні системи вивчаються під різними кутами зору: в аспектах програмної інженерії, теорії інформації, соціальної психології, в контексті понять електроніки, з позиції теорії конфліктних процесів.

С. Рассел та П. Норвіг називають раціональним агентом автономний об’єкт, який має мету та діє оптимальним способом заради її досягнення. В даній роботі розглядаються основні види діяльності, пов’язані з керуванням агентами і системами раціональних агентів: утворення системи агентів (кооперування), планування і координування дій агентів, розміщування системи, розпізнавання. Розглянуто математичні методи вибору оптимальних рішень в системах, що складаються з раціональних агентів, які діють оптимальним способом заради досягнення спільної мети.

Агенти, системи агентів та математичні методи, що їм притаманні

В літературі існує кілька визначень поняття “агент”. В роботі [1] агентом вважається автономний об’єкт, який має джерела інформації про навколишнє середовище (наприклад, фізичні датчики) та впливає на це середовище (наприклад, за допомогою виконавчих механізмів). Агентом може бути людина, робот, комп’ютерна програма. В цій же роботі наведено наступне визначення раціонального агента: “Для будь-якої послідовності актів сприйняття раціональний агент повинен обрати дію, яка, як очікується, максимізує його показники продуктивності, з врахуванням факторів, наданих даною послідовністю актів сприйняття та всіх вбудованих знань, що ними володіє агент”. Інакше кажучи, раціональним агентом вважається агент, який заради досягнення поставленої мети здатен діяти ефективно, тобто використовувати стратегії поведінки, близькі до оптимальних.

В роботі [1] структура агента умовно визначається формулою:

агент = архітектура + програма.

Мається на увазі, що програма агента повинна працювати в деякому обчислювальному пристрої, який має фізичні датчики та виконавчі механізми. Така програма повинна приймати дані від датчиків, розпізнавати та аналізувати дані, виробляти оптимальну стратегію поведінки агента і подавати команди виконавчим механізмам.

Якщо агент знаходиться в складному оточуючому середовищі, недостатньо задати мету, яку потрібно досягти, оскільки, як правило, існують різні послідовності дій агента, що ведуть до

мети. В таких випадках доцільно вважати, що існує функція корисності, яка визначена на множині можливих послідовностей дій агента (агентів, якщо розглядається система агентів) і приймає значення в множині дійсних чисел. В роботі [1] обгрунтовано наступне твердження: "Будь-який раціональний агент повинен діяти таким способом, щоб максимізувати функцію корисності".

Далі раціональним агентом називається агент, який заради досягнення мети діє оптимальним способом. Системою раціональних агентів називається система, що складається з раціональних агентів, які мають спільну мету і діють оптимальним способом для її досягнення. Агенти діють, використовуючи оптимальний (або близький до оптимального) розв'язок екстремальної задачі, що сформульована для системи. Прикладами таких систем можуть бути наступні:

– система роботів-таксистів;
– система рухомих агентів-датчиків, які здійснюють спостереження за деяким об'єктом;
– група дронів, що переслідують деяку ціль;
– спортивна команда;
– система економік різних країн, які розвиваються у взаємодії.

Однією з центральних проблем створення систем раціональних агентів є забезпечення агентів методами, що дають змогу діяти ефективно. Ці методи повинні враховувати стан оточуючого середовища, поставлені цілі, а також той факт, що агенти діють у складі системи.

Раціональні агенти та системи повинні мати в своєму розпорядженні математичні методи, що дозволяють будувати оптимальні стратегії поведінки, тобто скоординовані плани дій на основі даних, якими володіють агенти. Важливими є задачі створення систем оптимального складу, тобто задачі кооперування агентів, пошуку їхнього оптимального розміщення та відповідні методи оптимізації. Агенти у процесі розвитку подій повинні розпізнавати поточний стан навколишнього середовища та на основі результатів розпізнавання приймати ефективні рішення щодо своїх подальших дій. Тому агентам потрібні якісні математичні методи розпізнавання.

Можна виділити наступні основні групи задач і математичні методи їх розв'язання, що органічно притаманні системам раціональних агентів (далі замість назви "система раціональних агентів" використовуємо назви "система агентів" або "система"):

– кооперування агентів (створення системи агентів);
– планування дій агентів;
– координація дій агентів;
– розміщування системи агентів;
– розпізнавання.

Системи, що складаються з агентів, можуть бути досліджені в різних аспектах [2]:

– аспект програмної інженерії;
– математичний аспект;
– аспект теорії інформації;
– аспект соціальної психології;
– строго логічний аспект;
– ігровий аспект;
– в контексті понять електроніки.

В даній роботі розглядається аспект оптимізації дій, пов'язаних з системами агентів.

Розглянемо відмінності між раціональним агентом та агентами інших типів. Важливим є поняття інтелектуального агента. Автор роботи [3] вважає, що інтелектуальний агент повинен мати наступні властивості:

– реактивність – здатність сприймати стан оточуючого середовища та діяти відповідним способом;
– проактивність – здатність до цілеспрямованої поведінки та виявлення власної ініціативи заради досягнення мети;
– соціальну активність – здатність до взаємодії з іншими агентами, можливо з людьми, для досягнення мети.

Інтелектуальний агент вважається автономним. Автономність означає, що поведінка агента визначається його властивостями [4], накази та ресурси отримуються таким агентом від інших

агентів тільки інколи або не отримуються зовсім.

Якщо визначення інтелектуального агента містить тільки описані вище ознаки (реактивність, проактивність, соціальну активність, автономність), воно називається "слабим" [5]. Якщо крім цих ознак у визначенні інтелектуального агента присутні додаткові ознаки, таке визначення називається "сильним". Сильне визначення часто включає "ментальні" властивості агента:

– знання – частину знань агента, яка не змінюється на протязі його існування;
– переконання – частину знань агента, яка може змінюватися;
– бажання – стани, ситуації, які є бажаними для агента;
– наміри – те, що агент повинен зробити з огляду на свої зобов'язання перед іншими агентами, або те, що випливає з його бажань;
– цілі – множину кінцевих та проміжних цілей агента;
– зобов'язання перед іншими агентами – задачі, які агент виконує за дорученням інших агентів.

Вважаємо, що раціональні агенти можуть володіти деякими з наведених властивостей в тій мірі, в якій це необхідно для розв'язання задач, що виникають перед ними, та використання розв'язків.

Математичні моделі та методи вибору оптимальних рішень для агентів і багатоагентних систем

Для досягнення мети, що стоїть перед системою агентів, необхідне керування діями агентів. В роботі [6] керуванням називається "сукупність цілеспрямованих дій, що включає оцінку ситуації та стану об'єкта керування, вибір керівних дій та їх реалізацію". Оцінку ситуації слід розуміти як визначення фазового вектора x (або його наближеного значення), що цю ситуацію описує. Керування системою в ситуації x вибирається у вигляді вектора $u(x)$, який описує керівні дії для всіх агентів. Функція $u(x)$ називається стратегією поведінки системи (планом роботи). Вона визначає керування в залежності від ситуації, що склалася в деякий момент часу.

Перед визначенням ефективної стратегії $u(x)$ слід побудувати систему агентів, тобто розв'язати проблему кооперування. Кооперуванням називають об'єднання агентів у систему для досягнення спільної мети. Для побудови стратегії поведінки системи потрібно розв'язати задачі планування та координації дій агентів [3]. Під плануванням слід розуміти розроблення способу дій агентів та всієї системи в майбутньому в залежності від ситуацій, що можуть виникнути, вибір ефективного способу дій, оптимальний розподіл ресурсів. Координацією називається така організація дій різних агентів, що складають систему, яка забезпечує ефективність роботи цієї системи. Під час планування дій окремих агентів слід враховувати необхідність координації для забезпечення високого рівня ефективності всієї системи.

Кооперативне розв'язання задачі потрібне тоді, коли складність проблеми виходить за рамки індивідуальних можливостей агентів. Кооперування необхідне, якщо жоден агент не володіє достатнім досвідом, ресурсами та інформацією для розв'язання задачі, натомість різні агенти мають досвід та можливості для розв'язання різних частин проблеми [3, 7].

У роботі [8] стверджується, що кооперативне розв'язання задачі складається з трьох наступних етапів.

Задача декомпозиції. На першому етапі задача розбивається на підзадачі. Декомпозиція може бути ієрархічною, підзадачі можуть розбиватися на менші підзадачі аж до "атомарних" дій, які не можна декомпозувати далі.

Розв'язання підзадач. На цьому етапі розв'язуються підзадачі, що отримані на етапі декомпозиції. Агенти можуть обмінюватися інформацією: один агент може допомогти іншому, якщо володіє корисною інформацією.

Синтез розв'язку. Розв'язки підзадач використовуються для формування загального розв'язку. Як і для задачі

декомпозиції, цей етап може бути ієрархічним.

Способи реалізації наведеної схеми для різних предметних областей можуть значно відрізнятися [3]. В деяких областях окремі етапи можуть бути відсутніми.

В процесі кооперативного розв’язання розподіленої задачі виникає важлива проблема розподілу підзадач між агентами. В роботах [3, 8] описано протокол укладання контрактів, який використовує ті ж поняття, що застосовуються компаніями під час організації тендерів. Агент, для якого виникла потреба у розв’язанні складної задачі, дає об’яву про необхідність виконання робіт. Агенти, що можуть виконати роботу або її частину, згоджуються на пропозицію та повідомляють замовнику про свої можливості та вимоги. Замовник обирає виконавців, що відповідають його вимогам, після чого укладаються контракти.

Важливо встановити, чи відповідає агент-виконавець вимогам агента-замовника. Припустимо, виконавець повідомляє інформацію про себе у вигляді числового вектора ознак $(x_1, x_2, ..., x_n)$, де n – натуральне число. Кожна ознака x_i характеризує одну з його властивостей (продуктивність праці, рівень освіти тощо). Нехай замовник має у своєму розпорядженні навчальну вибірку, яка містить скінченне число векторів $(x_1, x_2, ..., x_n)$, що відповідають різним агентам, про які відомо, чи підходять вони для виконання відповідної роботи. Використовуючи навчальну вибірку та вектор $(x_1, x_2, ..., x_n)$, агент-замовник має вирішити, чи відповідає виконавець його вимогам. Описана задача є задачею розпізнавання образів та розв’язується за допомогою відповідних методів.

Утворення ефективних коаліцій є одним з ключових аспектів теорії систем агентів. В роботі [9] побудована загальна теорія оптимізації коаліцій агентів. Позначимо A множину агентів. Нехай S – підмножина агентів, які складають коаліцію. Позначимо v_S ціну коаліції S. Вважаємо, що $v_S \geq 0$. Коаліційною структурою (CS) називається розбиття множини A, тобто набір підмножин (коаліцій) множини A такий, що підмножини не перетинаються, а їх об’єднання становить A. Ціною коаліційної структури називається величина

$$V(CS) = \sum_{S \in CS} v_S .$$

В задачі CS вимагається знайти оптимальну коаліційну структуру

$$CS^* = \arg\max_{CS} V(CS) .$$

Входом задачі CS є множина цін всіх коаліцій $\{v_S\}$. В роботі [9] доведено теорему про NP-складність задачі CS та побудовано алгоритми, що розв’язують задачу із заданою точністю.

Вважається, що величини v_S можуть приймати довільні значення незалежно одна від одної. Незалежність цих величин суттєво використовується під час доведення NP-складності задачі CS та інших тверджень даної теорії. Однак це припущення справджується далеко не для всіх задач, на що вказують прості приклади.

Розглянемо ***планування дій*** системи за умови, що рух фазової точки $x = x(t)$ в n-вимірному фазовому просторі описується системою диференціальних рівнянь

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, ..., x_n, u_1, ..., u_r), \quad i = 1, ..., n,$$

або, у векторній формі,

$$\dot{x} = f(x, u).$$

В такому разі величину керування $u = u(x)$ часто називають стратегією поведінки системи. Задача вибору оптимального керування полягає в тому, щоб перевести фазову точку x з положення x^0, яке вона займає в момент часу 0, в будь-яке положення x^1, що належить заданій термінальній множині M, мінімізуючи величину

$$\int_0^T f_0(x, u) dt;$$

тут T – перший момент часу, такий, що $x^1 \in M$ [10, 11]. Для побудови оптимального плану дій $u(x)$ системи можна використати принцип максимуму Понтрягіна. Задача побудови функції $u(x)$ називається задачею синтезу [10]. В загальному випадку ця задача розв'язується за допомогою методів нелінійного програмування.

Нехай рух фазової точки описується системою диференціальних рівнянь $\dot{x} = f(x,u,v)$, де u та v – стратегії поведінки двох систем або двох агентів, що мають протилежні інтереси. Перший агент намагається мінімізувати задану функцію плати, використовуючи стратегію u, другий – максимізувати її за допомогою стратегії v. Такі задачі називаються диференціальними іграми, або конфліктно керованими процесами [12 – 16]. В теорії диференціальних ігор розроблено методи, які дозволяють будувати оптимальні або близькі до оптимальних плани дій сторін конфліктного процесу. В роботі [17] вивчаються властивості оптимальних стратегій переслідування.

Таблиця 1.

Частота використання математичних підходів у задачі планування руху роботів

Назва математичного підходу	Кількість (%)
Нечіткі множини	18.6
Генетичні алгоритми	12.8
Нейронні мережі	12.8
Математичне програмування	8.8
Алгоритм колонії мурах	7.8
Алгоритм рою часток	5.9
Алгоритм відпалу	4.9
Інші	28.4

Можна навести значну кількість прикладів застосування задач і методів оптимізації в плануванні дій раціональних агентів та систем. В роботі [18] наведено огляд праць, в яких для мобільних роботів розв'язуються задачі побудови допустимого маршруту між двома точками на площині або у тривимірному просторі. Часто намагаються будувати оптимальний або близький до оптимального маршрут. В [18] розглянуто 198 наукових праць, які були надруковані в період з 1980 р. по 2010 р. В таблиці 1 наведено кількість використаних математичних підходів у відсотковому відношенні.

Існують наступні можливості планування дій системи [19]: централізоване планування, розподілене розроблення централізованого плану, розподілене розроблення розподіленого плану. Наведені вище задачі відносяться в основному до розроблення централізованого плану дій системи агентів. Для розроблення такого плану та координації дій використовується структура (можливо, виділений агент) мета-рівня, в розпорядженні якої є необхідні ресурси та інформація.

Розподілене розроблення розподіленого плану означає, що структури мета-рівня не існує, агенти будують індивідуальні плани, взаємодіючи між собою. В такому випадку вважається, що агенти володіють обмеженими обчислювальними можливостями, інформацією про локальне оточення, обмеженими можливостями спілкування. Приклади включають групи автономних транспортних засобів, мобільні сенсорні мережі, маршрутизацію в мережах даних, системи транспортування, багатопроцесорні обчислення, енергетичні системи [20].

Для узгодження послідовності дій агентів у системах використовуються ***методи координації***, що описані в

роботах[3, 21]. Методи координації часто застосовуються в теорії розподіленого штучного інтелекту, а також для систем, у яких використовуються “ментальні” властивості агентів [5].

В роботі [21] розглянуто два рівня керування: координаційний та гібридний. На координаційному рівні виконуються процедури планування та координації дій агентів. На гібридному рівні на основі інформації, що надходить від координаційного рівня, виробляється керування всією системою. Розглядаються неперервний та дискретний випадки. У неперервному випадку рух фазової точки визначається системою диференціальних рівнянь та мінімізується час переходу фазової точки з початкового положення у термінальну множину. Результати роботи застосовуються для керування системами агентів, що складаються з роботів-маніпуляторів, мобільних роботів, мостових кранів.

Проблема ***розміщування системи*** агентів є важливою задачею, від якості розв’язання якої залежить успіх дій цієї системи. В роботі [22] описана математична теорія розміщування об’єктів, яку можна застосовувати для оптимізації розміщення систем агентів. Термін “об’єкт” трактується досить широко. Об’єктом може бути поліцейський відділок, пожежна частина, фабрика, карета швидкої допомоги тощо. В роботах [23, 24] вивчаються задачі пошуку оптимального розміщення сенсорів для виявлення загрози. Також об’єктом може бути раціональний агент.

В [22] розглянута наступна задача розміщування, яку називають задачею Ферма, задачею Вебера чи задачею Стейнера. Нехай m існуючих об’єктів знаходяться в точках площини $p^1, p^2, ..., p^m$, а n нових – в точках площини $x^1, x^2, ..., x^n$. Відстань між новим та існуючим об’єктами позначиимо $d(x^j, p^i)$, а відстань між двома новими об’єктами – $d(x^j, x^k)$. Позначимо w_{ji} витрати з перевезення (на одиницю відстані) між новим j-м та існуючим i-м об’єктами. Нехай v_{jk} – аналогічні витрати з перевезення між новими j-м та k-м об’єктами. Загальні витрати, пов’язані з розміщенням нових об’єктів у точках $x^1, x^2, ..., x^n$, визначаються формулою

$$f(x^1, x^2, ..., x^n) = \sum_{1 \le j < k \le n} v_{jk} d(x^j, x^k) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} w_{ji} d(x^j, p^i).$$

Вимагається знайти точки $x^1, x^2, ..., x^n$, для яких мінімізуються витрати $f(x^1, x^2, ..., x^n)$.

В число задач розміщування входять задачі про покриття множини, в яких вимагається визначити кількість об’єктів та місця їх розміщення [22]. Прикладом може бути задача розміщування пожежних команд у такий спосіб, щоб відстань до будь-якої точки міста долалася однією з команд не більше, ніж за п’ять хвилин. Задача може бути сформульована так:

$$\min \sum_{j=1}^{n} c_j x_j,$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \ge 1, \quad i = 1,2,...,m,$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1,2,...,n.$$

Величина a_{ij} дорівнює одиниці, якщо i-й споживач належить j-й області (покривається j-ю областю), в іншому випадку a_{ij} дорівнює нулю. Величина x_j дорівнює одиниці, якщо в j-й області знаходиться деякий об’єкт, інакше x_j дорівнює нулю. Вимагається “покрити” всіх споживачів з мінімальними витратами.

Наведені задачі можуть розв’язуватися методами математичного програмування. Для дискретних задач застосовуються методи вектора спаду [25], евристичні алгоритми, поліноміальні наближені схеми, метод гілок та меж, динамічне програмування, метод випадкового пошуку з локальною оптимізацією [26]. Для неперервних задач

можна використовувати методи лінійного, нелінійного та стохастичного програмування [27 – 38]. Важливе значення мають робастні методи оптимізації, які дозволяють знаходити близькі до оптимальних розв'язки за умови невизначеності даних [37]. Субоптимальні методи (тобто такі, трудомісткість яких близька до складності відповідного класу задач) опуклого програмування побудовані в роботі [27]. Ефективні методи внутрішньої точки розвинуті в [38].

Теорією ***розпізнавання образів*** називають математичну теорію, в якій розвиваються основи та методи класифікації об'єктів різного роду. Кожен об'єкт має множину ознак, за допомогою якої можна визначити клас, до якого належить даний об'єкт.

Загальна постановка задачі розпізнавання образів наведена в роботі [39]. Позначимо B скінченну множину об'єктів b. Кожен об'єкт $b \in B$ ототожнюється з цілочисельним вектором

$$(x_1, x_2, ..., x_n, f).$$

Де n – натуральне число,

$$x_j \in \{0,1,...,g-1\},$$

$$j = 1,2,...,n,$$

$$f \in \{0,1,...,h-1\},$$

g, h – натуральні числа, $g \geq 2, h \geq 2.$ Нехай на множині B існує розподіл ймовірностей P, який вважається невідомим. З цієї множини отримана навчальна вибірка (множина об'єктів) V. Нехай деякий об'єкт отримано з множини B незалежно від вибірки V згідно з розподілом P, причому відомі тільки значення ознак $x_1, x_2, ..., x_n$. Вимагається за цими ознаками, враховуючи навчальну вибірку V, знайти значення цільової ознаки f, тобто клас об'єкта. В роботі [40] описана задача називається задачею дискримінації.

В роботі [41] наведені наступні приклади задач розпізнавання.

Розпізнавання зображень. За формою предмета, його кольором, розміром, іншими ознаками вимагається впізнати предмет.

Медична діагностика. За результатами аналізів та обстеження вимагається встановити захворювання пацієта або факт відсутності хвороб.

Технічна діагностика. На основі результатів тестів та виявлених ознак слід визначити причину несправності технічної системи.

Класифікація в біології. Вимагається встановити місце нового (відкритого) живого об'єкта в прийнятій ієрархії живих організмів.

Класифікація ситуацій. Необхідно розпізнати тип ситуації, що виникла, для прийняття відповідного рішення. Конкретним прикладом є розпізнавання ситуації на виробництві диспетчером, який керує технологічним процесом.

Крім цих прикладів задач розпізнавання можна навести наступні.

Оптичне розпізнавання тексту [42]. Необхідно розпізнати символи (друковані, рукописні) з метою запису тексту в формі, придатній для обробки комп'ютером (наприклад, у коді ASCII).

Розпізнавання штрих-кодів.

Визначення мови аудіоповідомлення [43]. Вимагається автоматично встановити мову, маючи фонограму мовного повідомлення.

Розпізнавання мовлення. Необхідно автоматично перетворити звуковий сигнал, що складається з вимовлених слів, у текстовий потік, придатний для обробки комп'ютером [44].

В роботі [45] описані методи розв'язання задач розпізнавання: метод найближчих сусідів, лінійні вирішуючі правила, метод еталонів, байєсівські процедури розпізнавання. В роботах [46, 47] описується метод опорних векторів, в роботі [48] – метод потенціальних функцій, в роботах [49, 50] – структурні (лінгвістичні) методи. Крім названих методів розпізнавання існує значна кількість інших.

Існує проблема вибору якісного методу розпізнавання для даного класу задач. Для розв'язання цієї проблеми потрібно формалізувати такі поняття, як клас задач, метод розпізнавання, похибка методу тощо, побудувати теорію складності класів задач розпізнавання та

субоптимальні методи розпізнавання. Цій проблемі присвячено роботи [51, 52].

Висновки

Розглянуто поняття раціонального агента і системи таких агентів. Визначеноосновні види діяльності, пов'язані з керуванням агентами та системами раціональних агентів: розпізнавання, розміщування, кооперування, планування, координування дій агентів. Наведено приклади відповідних математичних задач. Розв'язання таких задач у складі систем зі штучним інтелектом дозволить підвищити ефективність цих систем.

Література

1. Russell S., Norvig, P. Artificial intelligence: a modern approach, 4th Edn. Hoboken, NJ: Pearson, 2021. 1115 p.
2. Dunin-Keplicz B., Verbrugge R. Teamwork in multi-agent systems: a formal approach. John Wiley & Sons, 2010. 224 p.
3. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. John Wiley & Sons, 2009. 348 p.
4. Нова філософська енциклопедія. Том 1. Під ред. Стьопіна В.С. Москва: Мисль, 2010. 744 с.
5. Городецький В.І., Грушинський М.С., Хабалов А.В. Багатоагентні системи. http://www.raai.org/library/ainews /1998/2/GGKHMAS.ZIP.
6. Автоматизовані системи. Терміни та визначення: ДСТУ 2226-93. [Чинний від 1993-04-01]. К.: Держстандарт України, 1993. 86 с. (Національний стандарт України).
7. Durfee E.H., Lesser V.R., Corkill D.D. Trends in cooperative distributed problem solving. IEEE Transactions on knowledge and data engineering. 1989. Vol. 1(1). P. 63–83.
8. Smith R.G., Davis R. Frameworks for cooperation in distributed problem solving. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. 1981. Vol. 11(1). P. 61–70.
9. Sandholm T., Larson K., Andersson M., Shehory O., Tohmé F. Coalition structure generation with worst case guarantees. Artificial intelligence. 1999. Vol. 111(1–2). P. 209–238.
10. Понтрягін Л.С., Болтянський В.Г., Гамкрелідзе Р.В., Міщенко Є.Ф. Математична теорія оптимальних процесів. Москва: Наука, 1969. 384 с.
11. Болтянський В.Г. Математичні методи оптимального керування. Москва: Наука, 1969. 408 с.
12. Айзекс Р. Диференціальні ігри. Москва: Мир, 1967. 480 с.
13. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Шевкопляс О.В. Теорія ігор. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. 424 с.
14. Чикрій А.А. Конфліктно керовані процеси. К.: Наук. думка, 1992. 384 с.
15. Красовський М.М., Субботін А.І. Позиційні диференціальні ігри. Москва: Наука, 1974. 455 с.
16. Рихсієв Б.Б. Диференціальні ігри з простим рухом. Ташкент: ФАН, 1989. 232 с.
17. Пашко С.В., Сініцин І.П. Величини прискорення в оптимальних стратегіях переслідування. Проблеми керування та інформатики. 2023. № 2. С. 5–17.
18. Tang S.H., Khaksar W., Ismail N.B., Ariffin M.K. A review on robot motion planning approaches. Pertanika Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 20(1). P. 15–29.
19. Durfee E.H. Distributed problem solving and planning. EASSS. 2001, Jan. P. 118–149.
20. Shamma J. Cooperative control of distributed multi-agent systems. John Wiley & Sons, 2008. 435 p.
21. Li H., Karray F., Basir O. A framework for coordinated control of multi-agent systems. Innovations in Multi-Agent Systems and Applications. 2010. № 1. P. 43–67.
22. Моудер Дж., Елмаграбі С. Дослідження операцій, том 2. Моделі та застосування. Москва: Мир, 1981. 684 с.
23. Pashko S., Molyboha A., Zabarankin M., Gorovyy S. Optimal sensor placement for underwater threat detection. Naval Research Logistics. 2008. № 7. P. 684–699.
24. Пашко С.В. Оптимальне розміщення багатосенсорної системи для виявлення загрози. Кібернетика та системний аналіз. 2018. № 2. С. 85–94.
25. Сергієнко І.В. Математичні моделі та методи розв'язування задач дискретної оптимізації. К.: Наук. думка, 1988. 471 с.
26. Пападимітріу Х., Стайгліц К. Комбінаторна оптимізація. Алгоритми і складність. Москва: Мир, 1985. 510 с.
27. Немировський А.С., Юдін Д.Б. Складність задач і ефективність методів оптимізації. Москва: Наука, 1979. 383 с.
28. Карманов В.Г. Математичне програмування. Москва: ФІЗМАТЛІТ, 2004. 264 с.
29. Ляшенко І.М., Карагодова О.О., Чернікова Н.В., Шор Н.З. Лінійне та нелінійне програмування. К.: Вища школа, 1975. 372 с.
30. Михалєвич В.С., Гупал А.М., Норкін В.І. Методи неопуклої оптимізації. Москва: Наука, 1987. 280 с.
31. Васильєв Ф.П. Числові методи розв'язування екстремальних задач. Москва: Наука, 1980. 519 с.
32. Васильєв Ф.П. Методи розв'язування екстремальних задач. Москва: Наука, 1981. 400 с.
33. Поляк Б.Т. Введення в оптимізацію. Москва: Наука, 1979. 384 с.
34. Пшеничний Б.М., Данілін Ю.М. Числові методи в екстремальних задачах. Москва: Наука, 1975. 320 с.
35. Шор Н.З. Методи мінімізації

недиференційованих функцій та їх застосування. К.: Наук. думка, 1979. 200 с.

36. Ермольєв Ю.М. Методи стохастичного програмування. Москва: Наука, 1976. 240 с.

37. Ben-Tal A., Ghaoui L., Nemirovskii A. Robust optimization. Princeton University Press, 2009. 542 p.

38. Nesterov Y., Nemirovskii A. Interior-point polynomial algorithms in convex programming. Philadelphia: SIAM, 1994. 405 p.

39. Журавльов Ю.І. Про алгебраїчний підхід до розв'язування задач розпізнавання або класифікації. Проблеми кібернетики: Вип. 33. 1978. С. 5–68.

40. Кендалл М., Стюарт А. Багатовимірний статистичний аналіз і часові ряди. Москва: Наука, 1976. 736 с.

41. Мазуров В.Д. Математичні методи розпізнавання образів. Єкатеринбург: Вид-во Урал. ун-ту, 2010. 101 с.

42. Козел В.О. Методи та етапи автоматичного розпізнавання тексту. Вісник Черкаського університету. Серія прикладна математика. Інформатика. 2010. Випуск 172. С. 75–86.

43. Шалімов І.А., Бессонов М.А. Аналіз стану та перспектив розвитку технологій визначення мови аудіоповідомлення. Праці Науково-дослідного інституту радіо. 2013. № 3. С. 24–31.

44. Вінцюк Т.К. Аналіз, розпізнавання та інтерпретація мовних сигналів. К.: Наук. думка, 1987. 262 с.

45. Волошин Г.Я. Методи розпізнавання образів. Владивосток: ВГУЕС, 2000. 74 с.

46. Довбиш А.С., Шелехов І.В. Основи теорії розпізнавання образів. Суми: Сумський держ. ун-тет, 2015. 108 с.

47. Hsieh C.J., Chang K.W., Lin C.J., Keerthi S.S., Sundararajan S. A dual coordinate descent method for large-scale linear SVM. Proceedings of the 25-th international conference on machine learning (2008 Jul. 5). P. 408–415.

48. Айзерман М.А., Браверман Е.М., Розоноер Л.І. Метод потенціальних функцій в теорії навчання машин. Москва: Наука, 1970. 384 с.

49. Шлезінгер М.І., Главач В.А. Десять лекцій зі статистичного та структурного розпізнавання. К.: Наук. думка, 2004. 546 с.

50. Фу К.С. Структурні методи в розпізнаванні образів. Москва: Мир, 1977. 320 с.

51. Гупал А.М., Пашко С.В., Сергієнко І.В. Ефективність байєсівської процедури класифікації об'єктів. Кібернетика та системний аналіз. 1995. № 4. С. 76–89.

52. Сергієнко І.В., Гупал А.М., Пашко С.В. Про складність задач розпізнавання образів. Кібернетика та системний аналіз. 1996. № 4. С. 70–88.

References

1. Russell S., Norvig, P. Artificial intelligence: a modern approach, 4th Edn. Hoboken, NJ: Pearson, 2021. 1115 p.

2. Dunin-Keplicz B., Verbrugge R. Teamwork in multi-agent systems: a formal approach. John Wiley & Sons, 2010. 224 p.

3. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. John Wiley & Sons, 2009. 348 p.

4. Stepin V.S. New philosophical encyclopedia. Vol. 1. Moscow: Mysl, 2010. 744 p.

5. Gorodetsky V.I., Grushinsky M.S., Khabalov A.V. Multiagent systems. http://www.raai.org/library/ainews /1998/2/GGKHMAS.ZIP.

6. Automated systems. Terms and definitions: DSTU 2226-93. [Effective from 1993-04-01]. K.: Derzhstandard of Ukraine, 1993. 86 p. (National Standard of Ukraine).

7. Durfee E.H., Lesser V.R., Corkill D.D. Trends in cooperative distributed problem solving. IEEE Transactions on knowledge and data engineering. 1989. Vol. 1(1). P. 63–83.

8. Smith R.G., Davis R. Frameworks for cooperation in distributed problem solving. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. 1981. Vol. 11(1). P. 61–70.

9. Sandholm T., Larson K., Andersson M., Shehory O., Tohmé F. Coalition structure generation with worst case guarantees. Artificial intelligence. 1999. Vol. 111(1–2). P. 209–238.

10. Pontryagin L.S., Boltyansky V.G., Gamkrelidze R.V., Myshchenko E.F. Mathematical theory of optimal processes. Moscow: Nauka, 1969. 384 p.

11. Boltyansky V.G. Mathematical methods of optimal control. Moscow: Nauka, 1969. 408 p.

12. Isaacs R. Differential games. New York: Dover Publications, 1999. 384 p.

13. Petrosyan L.A., Zenkevich N.A., Shevkoplyas E.V. Game theory. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2012. 424 p.

14. Chikrii A.A. Conflict-controlled processes. Kyiv: Nauk. Dumka, 1992. 384 p.

15. Krasovsky N.N., Subbotin A.I. Positional differential games. Moscow: Nauka, 1974. 455 p.

16. Rikhsiev B.B. Simple motion differential games. Tashkent: FAN. 1989. 232 p.

17. Pashko S.V., Sinitsyn I.P. Magnitudes of acceleration in optimal pursuit strategies. Problems of Control and Informatics. 2023. № 2. P. 5–17.

18. Tang S.H., Khaksar W., Ismail N.B., Ariffin M.K. A review on robot motion planning approaches. Pertanika Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 20(1). P. 15–29.

19. Durfee E.H. Distributed problem solving and planning. EASSS. 2001, Jan. P. 118–149.

20. Shamma J. Cooperative control of distributed multi-agent systems. John Wiley & Sons, 2008. 435 p.

21. Li H., Karray F., Basir O. A framework for coordinated control of multi-agent systems. Innovations in Multi-Agent Systems and Applications. 2010. № 1. P. 43–67.

22. Moder J., Elmaghraby S. Investigations of operations. Vol. 2. Models and applications. Moscow: Mir, 1981. 684 p.

23. Pashko S., Molyboha A., Zabarankin M., Gorovyy S. Optimal sensor placement for underwater threat detection. Naval Research Logistics. 2008. № 7. P. 684–699.

24. Pashko S.V. Optimal placement of a multi-sensor system for threat detection. Cybernetics and system analysis. 2018. № 2. P. 85–94.

25. Sergienko I.V. Mathematical models and methods for solving discrete optimization problems. K.: Nauk. Dumka, 1988. 471 p.

26. Papadimitriou H., Steiglitz K. Combinatorial optimization. Algorithms and complexity. Moscow: Mir, 1985. 510 p.

27. Nemirovskii A.S., Yudin D.B. Complexity of tasks and efficiency of optimization methods. Moscow: Nauka, 1979. 383 p.

28. Karmanov V.G. Mathematical programming. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 264 p.

29. Lyashenko I.N., Karagodova E.A., Chernikova N.V., Shor N.Z. Linear and non-linear programming. K.: Vishcha shkola, 1975. 372 p.

30. Mikhalevich V.S., Gupal A.M., Norkin V.I. Methods of non-convex optimization. Moscow: Nauka, 1987. 280 p.

31. Vasiliev F.P. Numerical methods for solving extreme problems. Moscow: Nauka, 1980. 519 p.

32. Vasiliev F.P. Methods for solving extreme problems. Moscow: Nauka, 1981. 400 p.

33. Polyak B.T. Introduction to optimization. Moscow: Nauka, 1979. 384 p.

34. Pshenichny B.N., Danilin Yu.M. Numerical methods in extremal problems. Moscow: Nauka, 1975. 320 p.

35. Shor N.Z. Methods for minimizing non-differentiable functions and their applications. K.: Nauk. Dumka, 1979. 200 p.

36. Ermoliev Yu.M. Methods of stochastic programming. Moscow: Nauka, 1976. 240 p.

37. Ben-Tal A., Ghaoui L., Nemirovskii A. Robust optimization. Princeton University Press, 2009. 542 p.

38. Nesterov Y., Nemirovskii A. Interior-point polynomial algorithms in convex programming. Philadelphia: SIAM, 1994. 405 p.

39. Zhuravlev Yu.I. On an algebraic approach to solving problems of recognition or classification. Problems of Cybernetics. Vol. 33. 1978. P. 5–68.

40. Kendall M., Stuart A. Multivariate statistical analysis and time series. Moscow: Nauka, 1976. 736 p.

41. Mazurov V.D. Mathematical methods of pattern recognition. Yekaterinburg: Publishing House Ural univ. 2010. 101 p.

42. Kozel V.O. Methods and stages of automatic recognition of the text. Bulletin of Cherkasy University. Series applied mathematics. Informatics. 2010. Issue 172. P. 75–86.

43. Shalimov I.A., Bessonov M.A. Analysis of the state and prospects for the development of technologies for determining the language of an audio message. Proceedings of the Radio Research Institute. 2013. № 3. P. 24–31.

44. Vintsyuk T.K. Analysis, recognition and interpretation of speech signals. K.: Nauk. Dumka, 1987. 262 p.

45. Voloshin G.Ya. Pattern recognition methods. Vladivostok: VGUES, 2000. 74 p.

46. Dovbish A.S., Shelekhov I.V. Fundamentals of the theory of recognition of images. Sumi: Sumy State. univ., 2015. 108 p.

47. Hsieh C.J., Chang K.W., Lin C.J., Keerthi S.S., Sundararajan S. A dual coordinate descent method for large-scale linear SVM. Proceedings of the 25-th international conference on machine learning (2008 Jul. 5). P. 408–415.

48. Aizerman M.A., Braverman E.M., Rozonoer L.I. Method of potential functions in the theory of machine learning. Moscow: Nauka, 1970. 384 p.

49. Shlesinger M.I., Glavach V.A. Ten lectures on statistical and structural recognition. K.: Nauk. Dumka, 2004. 546 p.

50. Fu K.S. Structural methods in pattern recognition. Moscow: Mir, 1977. 320 p.

51. Gupal A.M., Pashko S.V., Sergienko I.V. The effectiveness of the Bayesian procedure for classifying objects. Cybernetics and system analysis. 1995. № 4. P. 76–89.

52. Sergienko I.V., Gupal A.M., Pashko S.V. On the complexity of pattern recognition problems. Cybernetics and system analysis. 1996. № 4. P. 70–88.

The article has been sent to the editors 16.07.23.
After processing 17.08.23.
Submitted for printing 20.08.23.